




Paper Type: Original Article

Employing Efficient Algorithms to Reduce the Distance Traveled in Location-Routing Problems Considering Travel and Service

Amir Mohammad Golmohammadi^{1,*} , Alireza Goli², Hasan Rasay³

¹ Department of Industrial Engineering, Arak University, Arak, Iran; a-golmohammadi@araku.ac.ir.

² Department of Industrial Engineering and Future Studies, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran; goli.a@eng.ui.ac.ir.

³ Department of Industrial Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran; h.rasay@kut.ac.ir.

Citation:



Golmohammadi, A. M., Goli, A., & Rasay, H. (2022). Employing efficient algorithms to reduce the distance traveled in location-routing problem considering travel and service. *Innovation management and operational strategies*, 3(1), 48-61.

Received: 06/10/2021

Reviewed: 08/11/2021

Revised: 23/02/2022

Accepted: 28/02/2022

Abstract

Purpose: The study aims to present a mathematical model for reducing system costs by adequately locating the required warehouses and routing vehicles that carry the products from the warehouses within a time window.

Methodology: Concerning the specific nature of the location-routing problem, the consumption of fuel and the depreciation of vehicles are directly affected by the distance covered. The model proposed in this research seeks to minimize the undue length of the distance that vehicles have to travel. Moreover, to approximate the model to real-world conditions as much as possible, the 'time window' concept is employed to determine the maximum allowable time for the distribution of goods.

Findings: Three metaheuristic algorithms, including NSGA-II, PAES, and MOICA, are used to solve the proposed model. Several problems of different sizes are introduced and solved to evaluate the efficiency of the solutions. Then, the results are compared regarding the SM, MID, and QM criteria. The comparative results suggest the superiority of the MOICA algorithm for big-size problems.

Originality/Value: Setting a time window to reduce the distance travelled by the vehicles gets the model close to real-world conditions. It also makes it possible to estimate the costs more accurately.

Keywords: Metaheuristic algorithms, Optimization, Location routing problem.

<https://doi.org/10.22105/imos.2022.308682.1173>

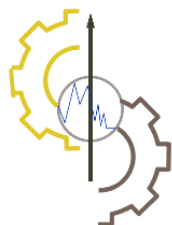
Corresponding Author: a-golmohammadi@araku.ac.ir



<https://dorl.net/dor/20.1001.1.27831345.1401.3.1.4.7>



Licensee. **Innovation Management & Operational Strategies**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



نوع مقاله: پژوهشی

6

به کارگیری الگوریتم‌های کارا برای کاهش اختلاف مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه در یک مسئله مکان‌یابی - مسیر یابی با در نظر گرفتن زمان سفر و سرویس دهی

امیر محمد گل محمدی^{۱*}، علیرضا گلی^۲، حسن رسائی^۳^۱ گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران.^۲ گروه مهندسی صنایع و آینده پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.^۳ گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران.

چکیده

هدف: ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی که هدف اصلی آن کاهش هزینه‌های سیستم از طریق مکان‌یابی مناسب انبارهای مورد نیاز و همچنین مسیر یابی وسایل نقلیه به منظور حمل کالاهای تولیدی به این انبارها با در نظر گرفتن زمان سفر است.

روش‌شناسی پژوهش: با توجه به ماهیت مسئله مکان‌یابی - مسیر یابی میزان سوخت مصرفی و استهلاک وسایل حمل و نقل رابطه مستقیمی با میزان مسافت طی شده توسط آن‌ها دارد. مدل ارائه شده در این مقاله در صدد کمینه کردن عدم توازن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه می‌باشد. همچنین برای نزدیکی هرچه بیشتر مدل ارائه شده به شرایط دنیای واقعی، با به کارگیری مفهوم پنجره‌ی زمانی حداکثر زمان مجاز برای توزیع محصولات نیز در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: برای حل مدل ارائه شده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری *MOICA*، *NSGA-II* و *PAES* استفاده شده است. برای نشان دادن کارایی روش‌های حل، نمونه مسائل مختلفی در اندازه‌های متفاوت ارائه و از طریق آن‌ها حل شده و نتایج خروجی از آن‌ها بر اساس معیارهای *QM*، *MID* و *SM* مقایسه شده است. نتایج حاصله بیانگر برتری الگوریتم *MOICA* ارائه شده در ابعاد بالاست.

اصالت/ارزش افزوده علمی: توازن در میزان مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل با توجه به در نظر گرفتن پنجره زمانی می‌تواند باعث نزدیکی مدل به دنیای واقعی شود و تخمین دقیق‌تری از هزینه‌ها را ارائه دهد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم‌های فرا ابتکاری، بهینه‌سازی، مسئله مکان‌یابی - مسیر یابی وسایل نقلیه.

۱- مقدمه

مدیریت واحدهای تولیدی و صنعتی می‌کوشند تا با مکان‌یابی مناسب انبارهای توزیع و پیدا کردن مسیرهای بهینه‌ی حمل و نقل، هزینه‌های تولید و توزیع خود را کاهش دهند. نگاه هم‌زمان به هر دو موضوع مسیر یابی وسایل نقلیه^۱ و جایابی انبارهای توزیع درون شهری می‌تواند جواب بهینه‌ای را برای هر دو مسئله ارائه نماید. در مدل ارائه شده در این مقاله، با در نظر گرفتن هم‌زمان مسیر یابی وسایل نقلیه و مکان‌یابی

^۱ Vehicle Routing Problem (VRP)

* نویسنده مسئول



انبارهای مورد نیاز برای توزیع محصول، جواب مناسبی برای هر دو مسئله به دست خواهد آمد. این در حالی است که نگاه مجزا به هر کدام از موارد نمی تواند جواب قابل قبولی را برای هر دو مسئله حاصل نماید.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

وب^۱ (۱۹۶۸) و کریستفیدز و ایلان^۲ (۱۹۶۹) جزء اولین افرادی بودند که متوجه شدند در نظرگیری هزینه های تحویل کالا به صورت حمل و نقل مستقیم بین دیو و مشتری، در مدل های مکان یابی صحیح نمی باشد. به گفته ی کاسبرتسون^۳ (۱۹۹۸) در فضای رقابتی فعلی که جلب رضایت مشتریان در گرو کاهش هر چه بیشتر زمان های تحویل کالاهای مورد تقاضای آنهاست، تصمیم گیری در مورد مکان دیوها و تعیین مسیرهای توزیع، از اهمیت زیادی برخوردار بوده و می تواند بر عملکرد کل زنجیره اثر بگذارد. همچنین سلهی و رند^۴ (۱۹۸۹) در مقاله ی خود به رابطه ی متقابل دو مسئله مکان یابی و مسیریابی^۵ و اثرات نادیده گرفتن ملاحظات مسیریابی در تصمیم گیری انتخاب مراکز توزیع پرداخته اند. مین و همکاران^۶ (۱۹۹۸) تفاوت اصلی بین *LRP* و مسئله مکان یابی-تخصیص^۷ کلاسیک را چنین مطرح می کنند: در *LRP*، پس از مکان یابی تسهیلات، مشتریان از طریق تور ملاقات می شوند ولی در *LAP*، سفر شعاعی یا خط مستقیم از تسهیلات برای هر مشتری فرض می شود. توکلی مقدم و همکاران^۸ (۲۰۰۵) یک مدل ریاضی برای مسئله ی حمل و نقل وسائط نقلیه ی بازگشتی^۹ را توسعه دادند که به دلیل پیچیدگی مدل، از الگوریتم متتیک برای حل آن استفاده کردند. بانیای و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۹) به بهینه سازی مسیریابی سبز با هدف جمع آوری زباله های شهری و تأثیر فناوری های صنعتی بر آگاهی و پایداری زیست محیطی پرداختند. حرکت سریع مردم به سمت شهرها منجر به این واقعیت شد که جمعیت شهری جهان اکنون سالانه حدود ۶۰ میلیون نفر در حال افزایش است. افزایش تعداد جمعیت شهرها تأثیر قابل توجهی بر حجم تولید شده زباله های خانگی دارد که باید به موقع جمع آوری و بازیافت شود. جمع آوری زباله های خانگی، به ویژه در مناطق مرکز شهر، چالش های گسترده ای دارد. سیستم جمع آوری باید قابل اعتماد، انعطاف پذیر، مقرون به صرفه و سبز باشد. آدلک و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۹) به ارائه یک مدل ریاضی جهت مکان یابی سبز برای جمع آوری پسماندهای جامد طبقه بندی شده در مراکز شهری پرجمعیت پرداختند. در مطالعه آنها یک مدل مکان یابی برای بهبود مجموعه ای از مواد زائد جامد ارائه شده است. این مدل به ویژه برای مناطق پرجمعیت و دارای چندین واحد مسکونی مناسب است و همچنین طبقه بندی اولیه پسماندها را عرضه می کند. ویژگی اساسی این مدل این است که با اختصاص دادن هر مشتری (خانه) به نزدیک ترین مرکز، مشتریان را به صورت خوشه ای دسته بندی می کند. هدف مدل ارائه شده توسط آنها این است که تعداد کل سایت های جمع آوری زباله فعال را به حداقل برسانیم، به طوری که کلیه درخواست های مشتریان بدون نقض محدودیت ظرفیت هر سایت برآورده شود. یک روش ابتکاری لاگرانژی ساده با حل کننده *CPLEX* در بستر *AMPL* برای حل مسئله ارائه شده است تا یک راه حل عملی پیدا کند. وانگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۰) به مدل سازی مسئله مسیریابی-مکان یابی سبز با بسته های زیست محیطی پرداختند. این مسئله شامل حل یک مسئله مسیریابی دو لایه و گذاشت و برداشت با پنجره های زمانی است. رفیعی مجد و همکاران^{۱۳} (۲۰۱۸) یک زنجیره ی تأمین سه سطحی، متشکل از یک تأمین کننده، تعدادی از مراکز توزیع و تعدادی از خرده فروشان را در قالب یک مسئله ی یکپارچه ی موجودی-مکان یابی-مسیریابی بررسی کردند. آنها برای حل از روش آزادسازی لاگرانژ استفاده کردند و یک الگوریتم ابتکاری را برای امکان سنجی پاسخ هایی که از طریق روش آزادسازی لاگرانژی پیدا می شود، استفاده کردند. باسو و همکاران^{۱۴} (۲۰۲۱) به بهینه سازی مسئله مسیریابی و وسایل نقلیه الکتریکی با در نظر گرفتن پنجره زمانی پرداختند. در این مطالعه، مسیریابی در دو سطح انجام می شود. در سطح اول بهترین مسیرها شناسایی شده و در بخش دوم با در نظر گرفتن پنجره زمانی، بهترین ترتیب بازدید مشخص می شود. از طرفی دیگر، مصرف انرژی به عنوان یک رکن مهم در این مسئله، به عنوان تابع هدف معرفی شده است. برای حل این مسئله از یادگیری ماشین بیزین احتمالی بهره برده شده است. نتایج پیاده سازی در گانتبرگ سوئد نشان می دهد که رویکرد پیشنهادی در این تحقیق توانسته است به میزان قابل توجهی ترافیک را در مسیرهای اصلی شهر کاهش دهد. لی و همکاران^{۱۵} (۲۰۱۹) یک مسئله ی مکان یابی-مسیریابی ظرفیت دار دوهدفه را برای کالاهای فاسدشدنی ارائه دادند و از الگوریتم شاخه و کران برای به دست آوردن راه حل بهینه استفاده کردند. جی و همکاران^{۱۶} (۲۰۲۰) برای حل مسئله

¹ Webb

² Christofides and Eilon

³ Cuthbertson

⁴ Salhi and Rand

⁵ Location Routing Problem (LRP)

⁶ Min et al.

⁷ Location Allocation Problem (LAP)

⁸ Tavakkoli-Moghaddam et al.

⁹ Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)

¹⁰ Bányai et al.

¹¹ Adeleke et al.

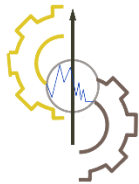
¹² Wang et al.

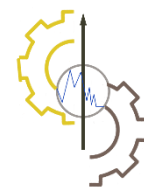
¹³ Rafie-Majd et al.

¹⁴ Basso et al.

¹⁵ Li et al.

¹⁶ Ji et al.





مسیریابی-موجودی محصولات فاسدشدنی با محدودیت‌های پنجره زمانی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط^۱ را ارائه دادند تا هزینه‌های کل را به حداقل برسانند و به دلیل عدم اطمینان از تقاضای بازار، رویکرد استوار را برای مسئله خود بکار بردند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل استوار می‌تواند به سطح بالاتری از خدمات لجستیک و توزیع دست یابد. ژائو و همکاران^۲ (۲۰۲۰) بهینه‌سازی مسئله مسیریابی وسایل حمل‌ونقل برای غذای تازه را در شبکه جاده‌ای بررسی کردند. این مقاله با در نظر گرفتن کنترل دما و ایمنی غذا یک مسئله‌ی مسیریابی وسیله نقلیه را با مدل پنجره‌ی زمانی ایجاد می‌کند و از الگوریتم کلونی مورچه برای حل مدل استفاده شده است. تی سانگ و همکاران^۳ (۲۰۲۱) یکپارچه‌سازی اینترنت اشیاء و برنامه‌ریزی تحویل چند دمایی برای لجستیک مواد غذایی فاسدشدنی را ارائه کردند. مقاله‌ی آن‌ها یک سیستم برنامه‌ریزی تحویل چند دمایی مبتنی بر اینترنت اشیاء را پیشنهاد و از یک الگوریتم ژنتیک دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند. شهابی شه‌میری و همکاران^۴ (۲۰۲۱) تحقیقی را تحت عنوان مسئله مسیریابی و زمان‌بندی برای شبکه‌های توزیع محصولات فاسدشدنی با وسایل نقلیه ناهمگن و تحویل جداگانه انجام دادند. این مقاله، یک مدل *MILP* سه منظوره را برای برنامه‌ریزی و مسیریابی وسایل نقلیه ناهمگن در یک سیستم بارانداز چندگانه مورد مطالعه قرار داده است. با توجه به ماهیت چندهدفه مدل پیشنهادی، یک روش ترکیبی دقیق، به‌عنوان یک راه‌حل پیشنهاد شده است. جدول ۱ برخی از مطالعات انجام شده در موضوع تحقیق بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱- خلاصه مطالعات انجام شده در حوزه مکان‌یابی-مسیریابی بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱.
Table 1- Summary of the literature review in Location Routing Problem (2017-2021).

ردیف	نویسنده	روش حل	مدل فاسدشدنی	مدل زمان‌بندی	مدل حمل‌ونقل	مدل توزیع	مدل زمان‌بندی	مدل حمل‌ونقل	مدل توزیع	نوع مسئله روش حل
۱	رفیعی و همکاران (۲۰۱۸)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	ILRP
۲	لی و همکاران (۲۰۱۹)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	LRP
۳	جی و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	IRP
۴	ژائو و همکاران (۲۰۲۰)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	TRP
۵	تی سانگ و همکاران (۲۰۲۱)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	VRP
۶	شهابی شه‌میری و همکاران (۲۰۲۱)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	RSP

با توجه به مقالات بررسی شده می‌توان دریافت که به دلیل اهمیت موضوع در بحث لجستیک نظر پژوهشگران و مدیران صنعت به این موضوع بیش‌ازپیش جلب شده و مدل‌های مربوط به این‌گونه مسائل در حال توسعه و تخصصی سازی برای صنایع مختلف با توجه به محدودیت‌های خاص محصولات آن صنعت می‌باشد. مرور ادبیات صورت گرفته نشان داد که تاکنون تحقیقی در حوزه مسائل مکان‌یابی-مسیریابی به در نظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه کل سیستم و همچنین حداقل کردن عدم توازن بارکاری وسایل نقلیه به‌طور هم‌زمان نپرداخته است. علاوه بر این، در تحقیق حاضر سعی شده ضمن ارائه مدلی مناسب برای اهداف مذکور، روش حل مناسبی برای مسائل نمونه ارائه شود و کارایی آن با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق به ارائه‌ی یک مدل ریاضی دو هدفه برای حل مسئله‌ی مکان‌یابی-مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود پرداخته شده است.

۳- تعریف مسئله و بیان اهداف تحقیق

هدف این مسئله آن است که به‌طور هم‌زمان تعداد و محل بهینه‌ی انبارهای منتخب، تخصیص بهینه‌ی مشتریان به انبارها، تخصیص بهینه‌ی مشتریان به وسایل حمل و توالی بهینه‌ی خدمت‌دهی به مشتریان را در هر مسیر طوری مشخص کند که هزینه‌ی کل توزیع شامل هزینه‌ی استقرار انبارها و هزینه‌ی حمل‌ونقل وسایل نقلیه با توجه به در نظر گرفتن حداکثر زمان حمل و توزیع، حداقل گردد. همچنین مدل ارائه‌شده درصدد کمینه کردن اختلاف مسافت طی شده توسط وسایل حمل‌ونقل می‌باشد. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای استفاده شده در مدل ریاضی به شرح زیر تعریف می‌شوند.

¹ Mixed Integer Linear Programming (MILP)
² Zhao et al.

³ Tsang et al.
⁴ Shahabi-Shahmiri et al.

مجموعه‌ها.

I : مجموعه همه مراکز توزیع (انبارها).

J : مجموعه همه مشتریان.

K : مجموعه همه وسایل حمل و نقل.

پارامترها.

N : تعداد مشتریان.

D_{ij} : فاصله بین مشتری i و j ، به طوری که $i, j \in I \cup J$.

C_{ij} : هزینه واحد مسافت بین مشتری i و j ، به طوری که $i, j \in I \cup J$.

t_{ij} : زمان حمل و نقل بین مشتری i و j ، به طوری که $i, j \in I \cup J$.

F_i : هزینه ثابت استقرار مرکز توزیع i .

FV_k : هزینه ثابت استفاده از وسیله حمل k .

d_j : تقاضای هر مشتری j .

s_{jk} : زمان سرویس وسیله نقلیه در محل مشتری j توسط وسیله k .

w_{jk} : زمان انتظار وسیله نقلیه در محل مشتری j توسط وسیله k .

Q : ظرفیت ثابت وسایل حمل و نقل.

B : کل زمان سفر سپری شده توسط وسایل نقلیه.

DI : میزان عدم توازن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه.

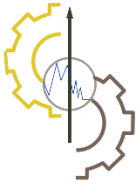
متغیرهای تصمیم.

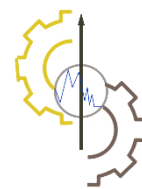
x_{ijk} : برابر یک است اگر گره (مجموع مشتریان و انبارها) i در مسیر k پس از گره j قرار گرفته باشد و در غیر این صورت صفر ($i, j \in I \cup J$).

y_i : برابر یک است اگر انبار i استقرار یافته باشد؛ و در غیر این صورت صفر.

z_{ij} : برابر یک است اگر مشتری j به انبار i تخصیص یابد و در غیر این صورت صفر.

U_{lk} : متغیرهای کمکی برای حذف زیرتور در مسیر k .





$$\text{Min TC} = \sum_{i \in I} F_i y_i + \sum_{k \in K} FV_k \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ij} D_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\text{Min DI} = \text{Max} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} x_{ijk} \right) - \text{Min} \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} D_{ij} x_{ijk} \right), \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\text{Subject to:} \quad \sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1, \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, i \in I \cup J \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} (x_{iuk} + x_{ujk}) \leq 1, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} t_{ij} x_{ijk} + \sum_{j \in J} (s_{jk} + w_{jk}) \sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} \leq B, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$z_{ij} \leq y_i, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$U_{gk} - U_{jk} + N x_{gjk} \leq N - 1, \quad \forall g, j \in J, k \in K \quad (10)$$

$$x_{ijk}, y_i, z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in I \cup J, k \in K \quad (11)$$

$$U_{lk} \geq 0. \quad \forall l \in I, k \in K \quad (12)$$

تابع هدف (۱) به دنبال کمینه کردن هزینه حمل و نقل، هزینه ثابت استقرار انبارها و هزینه ثابت استفاده از ماشین‌آلات می‌باشد.

تابع هدف (۲) به دنبال کمینه کردن عدم توازن مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه می‌باشد. به عبارت دیگر این هدف می‌کوشد تا میان مسافت طی شده توسط وسایل نقلیه بالانس ایجاد کند. در این تابع هدف اختلاف میان ماکزیموم و مینیوم مسافت طی شده، حداقل می‌گردد و حداقل شدن این شکاف موجب توازن مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل خواهد شد. **رابطه (۳)** هر مشتری را تنها به یک وسیله نقلیه اختصاص می‌دهد. به عبارتی هر مشتری تنها توسط یک مرکز توزیع سرویس داده خواهد شد. **محدودیت (۴)** به معادله‌ی حفظ روند معروف است و برای وسایل نقلیه این الزام را به وجود می‌آورد که وسیله نقلیه به هر گره (مشتری) که وارد شد باید از همان گره نیز خارج شود. **رابطه (۵)** این محدودیت را بیان می‌کند که هر وسیله نقلیه حداکثر یک بار می‌تواند اعزام گردد. **رابطه (۶)** محدودیت ظرفیت را برای مجموعه‌ی وسایل حمل و نقل نشان می‌دهد. **محدودیت (۷)** مشخص می‌کند که تنها زمانی یک مشتری می‌تواند به یک انبار اختصاص یابد که مسیری که مشتری در آن قرار دارد، متعلق به آن انبار باشد. به عبارت دیگر این محدودیت تضمین می‌دهد که اگر یک توزیع‌کننده و تقاضا روی یک مسیر باشند تقاضا متعلق به آن توزیع‌کننده است. **رابطه (۸)** محدودیت حداکثر زمان مجاز جهت توزیع محصولات است و بیان می‌کند که کل زمان سفر توسط وسایل نقلیه از یک مقدار B کمتر است. **محدودیت (۹)** تعیین می‌کند که یک مشتری زمانی می‌تواند به یک انبار تخصیص یابد که آن انبار حتماً استقرار داده شده باشد. **رابطه (۱۰)** محدودیت‌های حذف تورهای فرعی را ایجاد می‌کند. **روابط (۱۱)** و **(۱۲)**، محدودیت‌های مربوط به دامنه‌ی متغیرها می‌باشند.

۴- روش حل پیشنهادی

برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم‌های فرا ابتکاری رقابت استعماری^۱ و ژنتیک^۲ و استراتژی تکاملی پاره تو^۳ استفاده شده است. در ادامه نحوه‌ی عملکرد الگوریتم رقابت استعماری به تفصیل در ادامه بیان می‌شود.

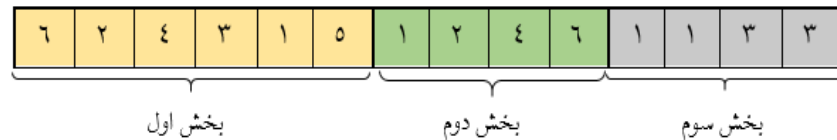
^۱ Imperialism Competitive Algorithm (ICA)

^۲ Genetic Algorithm (GA)

^۳ Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)

همان گونه که کاملاً مشخص است، کارایی یک الگوریتم و کیفیت جواب های خروجی به طور کامل وابسته به نحوه نمایش جواب در فضای جواب است. همچنین نمایش جواب باید به گونه ای باشد که بتوان به راحتی و تقریباً وسیع فضای جواب را جستجو کرد. در این تحقیق نمایش جواب به صورت یک رشته عددی بیان می شود. این نمایش جواب بایستی هم زمان مکان انبارها، نحوه تخصیص مشتریان به انبارها و همچنین مسیر بین مشتری ها را نیز نمایش دهد.

n جزء اول توالی مشتریان را در هر مسیر تعیین می کند. قسمت دوم نمایش جواب (m) شماره مشتریانی که بایستی با وسیله حمل و نقل سرویس دهی شوند بوده و در نهایت قسمت سوم مکان انبارها و اینکه هر کدام از وسایل نقلیه از کدام انبار شروع به حرکت نمایند را نشان می دهد.



شکل ۱- یک نمونه نمایش جواب.

Figure 1- General View of the chromosome structure.

۲-۴- تولید امپراطوری های اولیه

هر حل در الگوریتم رقابت استعماری به شکل یک ارائه می باشد. هر ارائه شامل مقادیر بهینه شده متغیر می باشد. در واژگان الگوریتم ژنتیک، این ارائه، کروموزوم نامیده می شود. در الگوریتم مذکور عنوان کشور برای ارائه استفاده شده است. در یک مسئله بهینه سازی N بعدی، یک کشور یک ارائه $1 \times N$ می باشد و این ارائه به صورت $Country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_N]$ تعریف می شود. هر متغیر در یک کشور به عنوان یک مشخصه اجتماعی سیاسی آن کشور مشخص می گردد. از این دیدگاه، الگوریتم بهترین کشور را که کشوری است با بهترین ترکیب مشخصه های اجتماعی سیاسی مثل فرهنگ، زبان و خط مشی اقتصادی، جستجو می کند. پس از تولید کشورها، از تکنیک ناچیرگی و فاصله تراکم برای ایجاد و رتبه بندی اعضای هر یک از جبهه ها تشریح شده است. برای محاسبه مقدار هزینه یا قدرت هر امپراطوری، مقدار هر تابع هدف برای هر امپراطور به دست آمده است. سپس مقدار هزینه هر تابع هدف به صورت معادله (۱۳) محاسبه شده است.

$$Cost_{i,n} = \frac{|f_{i,n}^p - f_{i,n}^{p,best}|}{f_{i,total}^{p,max} - f_{i,total}^{p,min}} \quad (13)$$

که $Cost_{i,n}$ مقدار نرمال شده تابع هدف i برای امپراطور n می باشد. همچنین $f_{i,n}^{p,best}$ ، $f_{i,total}^{p,max}$ و $f_{i,total}^{p,min}$ به ترتیب بهترین، حداکثر و حداقل مقادیر تابع هدف i در هر تکرار می باشد. سرانجام مقدار هزینه نرمال شده هر امپراطور به صورت معادله (۱۴) به دست می آید.

$$Total\ Cost_n = \sum_{i=1}^r Cost_{i,n} \quad (14)$$

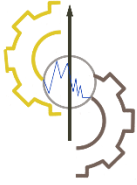
به گونه ای که r مقدار تابع هدف می باشد. قدرت هر امپراطور بعد از هزینه نرمال شده به دست آمده به صورت معادله (۱۵) محاسبه می گردد و مستعمره ها مطابق با قدرت هر امپراطور بین آن ها توزیع می شوند.

$$p_n = \left\lfloor \frac{Total\ Cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} Total\ Cost_i} \right\rfloor \quad (15)$$

سپس تعداد اولیه مستعمره های یک امپراطور به صورت معادله (۱۶) تعیین می گردد.

$$NC_n = round\{p_n \cdot N_{col}\} \quad (16)$$

¹ Initial solution





به طوری که NC_n تعداد اولیه مستعمره‌های امپراطور n ام و N_{col} تعداد کل مستعمره‌ها می‌باشد. NC_n از مستعمره‌ها به صورت تصادفی انتخاب و به هر امپراطور داده می‌شوند. امپراطور با قدرت بیشتر نسبت به امپراطور ضعیف‌تر مستعمره‌های بیشتری خواهد داشت.

۴-۳- قدرت کل یک امپراطوری

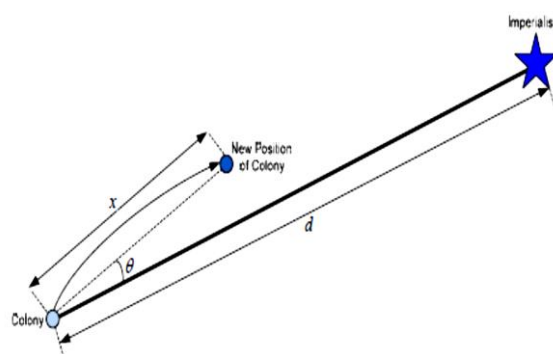
قدرت کل یک امپراطور تحت تأثیر قدرت کشور امپراطور می‌باشد. اگرچه قدرت مستعمره‌های یک امپراطوری نیز بر قدرت کل آن امپراطوری تأثیر دارد؛ بنابراین قدرت کل یک امپراطوری به صورت معادله (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$TP Emp_n = (Total Cost(imperialist_n) + \xi mean\{Total Cost(colonies of empire_n)\}). \quad (17)$$

$TP Emp_n$ قدرت کل امپراطوری n ام می‌باشد و ξ یک عدد مثبت کمتر از یک می‌باشد.

۴-۴- حرکت مستعمره‌های یک امپراطوری به طرف امپراطور

پس از تقسیم مستعمره‌ها به امپراطورها، مستعمره‌ها به طرف امپراطورشان حرکت می‌کنند. این حرکت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- حرکت مستعمره‌ها به سمت امپراطوری‌ها.

Figure 2- Movement of colony to its new location in ICA.

d فاصله بین مستعمره و امپراطور می‌باشد. X یک متغیر تصادفی با توزیع یکنواخت بین صفر و $\beta \times d$ می‌باشد و β یک عدد بزرگ‌تر از یک است. مسیر حرکت با زاویه θ نشان داده شده است. نرخ جواب‌هایی که به امپراطور نزدیک می‌شوند را با P_A نشان می‌دهیم.

۴-۵- انتقال اطلاعات بین مستعمره‌ها

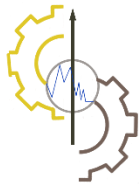
جهت انتقال اطلاعات بین مستعمره‌ها از اپراتور تقاطع در الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. برای عملگر تقاطع از انواع تقاطع تک نقطه‌ای و دو نقطه‌ای استفاده شده است. برای انتخاب مستعمره‌ها از روش انتخاب تورنمنت استفاده شده است. همچنین درصدی از جواب‌ها که تحت عمل تقاطع قرار می‌گیرند را با P_c نشان می‌دهیم.

۴-۶- انقلاب

در هر دوره ده ساله، انقلاب روی برخی مستعمره‌ها رخ می‌دهد. این روش مشابه روش جهش در الگوریتم ژنتیک بوده و برای فرار از جستجوهای محلی صورت می‌گیرد.

۴-۷- مستعمره‌های به روز شده

در هر دوره ده ساله، جمعیت اولیه مستعمره‌ها، جمعیت شبیه‌سازی شده، جمعیت حاصل از انتقال اطلاعات بین مستعمره‌ها، جمعیت حاصل از انقلاب و جمعیت حاصل از بهبود امپراطور، برای هر امپراطوری با یکدیگر ادغام شده که جمعیت ادغام شده نامیده می‌شود. به‌روزرسانی آرشو مطابق با جمعیت ادغام شده انجام می‌گردد و سپس بهترین مستعمره‌ها بر اساس مرتب‌سازی ناچیره برای هر امپراطور انتخاب می‌شود.



در یک رقابت امپریالیستی قدرت امپراطور ضعیف‌تر کاهش و قدرت امپراطور قوی‌تر در رقابت امپریالیستی افزایش خواهد یافت. در تمام رقابت امپراطوری‌ها با یکدیگر، ضعیف‌ترین مستعمره‌ی ضعیف‌ترین امپراطوری تصاحب خواهد شد. از سوی دیگر، اولین انتخاب ضعیف‌ترین مستعمره‌های ضعیف‌ترین امپراطوری توسط قوی‌ترین امپراطور یعنی امپراطور برنده از بین تمام امپراطوری‌ها، در رقابت امپریالیستی تصاحب می‌شود. در این رقابت، قوی‌ترین امپراطوری قطعاً این مستعمره‌ها را تصاحب نخواهد کرد، اگرچه این امپراطوری‌ها احتمال بیشتری جهت تصاحب کردن آن‌ها دارند. برای محاسبه احتمال تصاحب هر امپراطوری کل هزینه نرمال شده به صورت معادله (۱۸) بیان می‌شود.

$$NTP Emp_n = \max\{TP Emp_i\} - TP Emp_n. \quad (18)$$

$NTP Emp_n$ قدرت کل نرمال شده امپراطوری n ام و $TP Emp_n$ قدرت کل امپراطوری n ام می‌باشد. با داشتن قدرت کل نرمال شده، احتمال تصاحب هر امپراطوری به صورت معادله (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$P_{p_n} = \left| \frac{NTP Emp_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTP Emp_i} \right|. \quad (19)$$

۹-۴- تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فرا ابتکاری

از آنجایی که کارایی یک الگوریتم به شدت به پارامترهای آن وابسته است به طوری که پارامترهای مختلف ممکن است جواب‌های کاملاً متفاوتی با کیفیت‌های متفاوت تولید کنند، اگر پارامترها به طور صحیح تنظیم نشوند، نمی‌توان به جواب‌های مناسبی دست یافت. جهت تنظیم کردن پارامترهای الگوریتم پیشنهادی در این مطالعه از روش تاگوچی^۱ استفاده شده است.

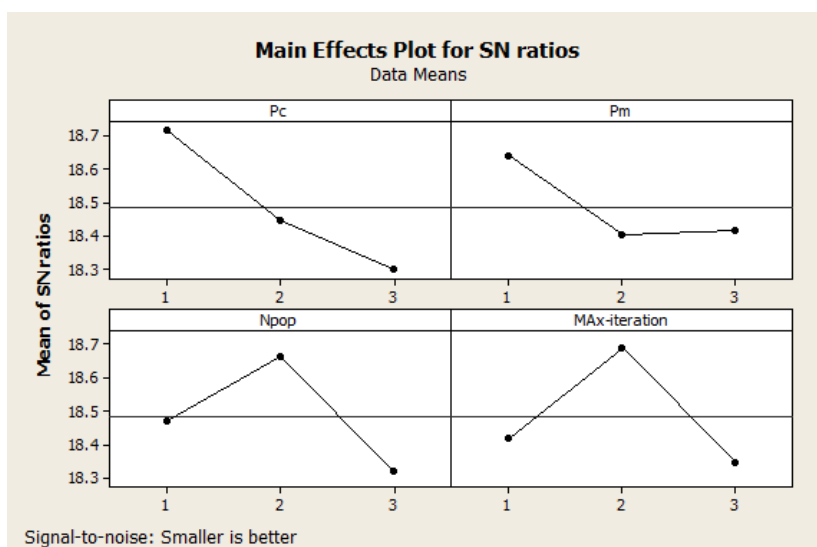
بر اساس ساختار روش تاگوچی ابتدا برای هر یک از پارامترهای الگوریتم $NSGA-II$ ، سه سطح پیشنهاد می‌شود. مقادیر پیشنهادی به شرح جدول ۲ می‌باشد. سپس به ازاء طرح $L9$ تاگوچی به ازاء حالات زیر الگوریتم $NSGA-II$ اجرا شده است. پس از وارد کردن این اطلاعات در نرم افزار $MINITAB$ و اجرای روش تاگوچی، نمودار S/N به صورت شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس نمودارهای شکل ۳، برای هر پارامتر مقداری مناسب است که کمترین مقدار S/N را داشته باشد. لذا در خصوص الگوریتم $NSGA-II$ مقادیر ستون سمت راست در جدول ۲ مقادیر بهینه می‌باشند و مثال‌های عددی با این مقادیر اجرا خواهند شد.

جدول ۲- پارامترها و سطوح مقادیر و مقادیر بهینه‌ی آن‌ها برای الگوریتم $NSGA-II$.

Table 2- Considered levels of parameters of NSGAII.

پارامتر	مقادیر هر سطح			مقدار بهینه انتخاب شده
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	
درصد تقاطع (Pc)	0.7	0.8	0.9	0.8
درصد جهش (Pm)	0.05	0.1	0.15	0.05
اندازه جمعیت (N-pop)	50	100	150	150
تعداد تکرار (Max-iteration)	100	200	300	300

¹ Taguchi



شکل ۳- خروجی روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II.
Table 3- Mean S/N ratios for the proposed NSGAII.

۴-۱۰- شاخص‌های مقایسه

از آنجایی که برای مقایسه الگوریتم‌ها از شاخص‌های مختلفی استفاده خواهد شد، در این قسمت به شرح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم. شاخص یکنواختی فضای^۱ (SM): این شاخص یکنواختی توزیع جواب‌های پاره‌تو در فضای حل را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه‌ی این شاخص مطابق رابطه (۲۰) می‌باشد.

$$SM = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{d} - d_i|}{(n-1)\bar{d}} \quad (20)$$

که در آن d_i برابر با فاصله اقلیدسی بین دو جواب پاره‌توی کناری در فضای حل می‌باشد. همچنین \bar{d} نیز برابر میانگین فواصل d_i ها می‌باشد. هر چه شاخص SM بیشتر باشد، الگوریتم بهتر است.

شاخص کیفیت^۲ (QM): شاخص کیفیت بدین گونه است که کلیه جواب‌های پاره تو به‌دست‌آمده توسط هریک از الگوریتم‌ها را با هم در نظر گرفته، سپس عملیات ناچیرگی را برای کلیه جواب‌ها انجام می‌دهیم. در نهایت، کیفیت هر الگوریتم برابر با سهم جواب‌های پارتوی جدید مختص به آن الگوریتم است. کیفیت بالاتر به‌منزله بهتر بودن الگوریتم می‌باشد.

فاصله از نقطه ایده آل^۳ (MID): مقدار این شاخص برابر با فاصله نقاط پاره‌تو الگوریتم مورد بررسی از نقطه ایده آل است. در این مطالعه با توجه به توابع هدف که هر دو کمینه‌سازی است، نقطه ایده آل را برابر با (۰ و ۰) در نظر می‌گیریم. شاخص MID را می‌توان توسط رابطه (۲۱) محاسبه کرد.

$$MID = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{f_{1i} - f_1^{best}}{f_{1,total}^{max} - f_{1,total}^{min}} \right)^2 + \left(\frac{f_{2i} - f_2^{best}}{f_{2,total}^{max} - f_{2,total}^{min}} \right)^2}}{n} \quad (21)$$

¹ Spacing Metric (SM)

² Quality Metric (QM)

³ Mean Ideal Distance (MID)

که در آن n برابر تعداد نقاط پاره تو و همچنین $f_{i,total}^{min}$ و $f_{i,total}^{max}$ به ترتیب برابر با بیشینه و کمینه مقدار توابع هدف در میان تمامی توابع هدف الگوریتم‌های مورد مقایسه است. در فرمول بالا مختصات نقطه‌ی ایده آل برابر با (f_1^{best}, f_2^{best}) است که در مطالعه حاضر (۰ و ۰) است. پایین بودن MID به منزله‌ی بهتر بودن الگوریتم می‌باشد.

۵- نتایج محاسباتی

در این بخش تعدادی مسائل نمونه با سایزهای کوچک، متوسط و بزرگ ایجاد شده و توسط الگوریتم‌های پیشنهادی اجرا می‌شود تا کارایی آن‌ها بررسی گردد. برای هر یک از دسته مسائل فوق، تعداد مشخصی مکان بالقوه جهت احداث مرکز توزیع به ازاء تعداد مشخصی مشتری از پیش تعیین شده، در نظر گرفته شده است. به دلیل NP -Hard بودن مسئله، روش حل دقیق محدودیت اپسیلون^۱ قابلیت حل مدل در ابعاد بزرگ را ندارد؛ بنابراین پس از اثبات کارایی الگوریتم $NSGA-II$ مورد استفاده در این تحقیق در اندازه‌های کوچک و متوسط، از این الگوریتم برای به دست آوردن جواب‌های پاره‌توی مسئله در ابعاد بزرگ استفاده می‌شود. همچنین می‌توان نتایج حاصل از آن را با نتایج حاصل از الگوریتم‌های رقابت استعماری و استراتژی تکاملی پاره تو^۲ مقایسه کرد. به منظور ارزیابی خطای نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم $NSGA-II$ ، به ازاء هر تابع هدف، بهترین نتیجه به دست آمده از الگوریتم با بهترین جواب به دست آمده از روش حل دقیق مقایسه شده است. در جدول ۳ نتایج مربوط به حل مسائل کوچک و متوسط نشان داده شده است. در این جدول ستون اول شماره ردیف، ستون دوم مربوط به شماره مسئله است که هر شماره شامل سه بخش است و به ترتیب از چپ به راست نشان‌دهنده‌ی تعداد مشتریان، تعداد انبارهای بالقوه و تعداد وسایل حمل و نقل است؛ به عنوان مثال ۱۰/۳/۲ به این معنی است که مسئله شامل ۱۰ مشتری، ۳ مرکز توزیع بالقوه و ۲ وسیله حمل و نقل می‌باشد. در ستون سوم بهترین جواب به دست آمده برای تابع هدف اول بدون در نظر گرفتن تابع هدف دوم و در ستون چهارم زمان حل این مسئله آمده است. ستون‌های پنجم و ششم نیز همانند ستون‌های سوم و چهارم می‌باشند با این تفاوت که این بار بهترین جواب به دست آمده برای تابع هدف دوم، بدون در نظر گرفتن تابع هدف اول آمده است. به همین ترتیب در ستون‌های هفتم الی دهم مقادیر مرتبط با روش $NSGA-II$ با ۳۰۰ تکرار نشان داده شده است. در دو ستون انتهایی نیز خطای حاصل از روش $NSGA-II$ در هر یک از توابع هدف گزارش شده است. لازم به ذکر است مقادیر اعلام شده برای توابع هدف و زمان حل میانگین ۱۰ بار اجرای الگوریتم می‌باشد.

جدول ۳- نتایج محاسباتی برای حل مسئله در ابعاد کوچک و متوسط.

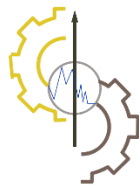
Table 3- Computational results for small and medium scale problems.

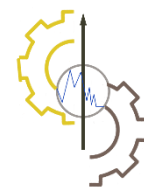
شماره مسئله	هدف ۱	ت.ب. ۱	هدف ۲	ت.ب. ۲	الگوریتم $NSGA-II$		روش محدودیت اپسیلون		درصد خطای $NSGA-II$	
					هدف ۱	ت.ب. ۱	هدف ۲	ت.ب. ۲	هدف ۱	هدف ۲
1	4/2/2	6008	1	40	6008	1	12	40	0.00	0.00
2	6/2/3	6639	55	56	6639	4	633	56	0.00	0.00
3	8/2/3	6985	72	85	6989	5	796	85	0.06	1.16
4	8/3/3	9544	94	72	9563	6	1083	72	0.19	0.00
5	9/3/4	9863	356	122	9980	14	1318	122	1.17	2.40
6	10/3/3	9759	271	80	9822	14	1229	80	0.64	1.23
7	10/3/5	10146	1018	94	10358	27	2477	94	2.04	2.08
8	12/3/5	14215	3293	109	14362	39	5145	109	1.02	0.90
9	12/4/4	16489	3124	30	16576	38	5823	30	0.52	0.00
10	14/4/5	17964	5894	112	18356	63	9857	112	2.13	2.60

بررسی زمان حل مسئله برای الگوریتم $NSGA-II$ و روش محدودیت اپسیلون نشان می‌دهد با افزایش سایز مسئله، زمان حل با استفاده از روش محدودیت اپسیلون به صورت نمایی افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که افزایش این زمان برای الگوریتم $NSGA-II$ تقریباً خطی است. به دلیل وابستگی زیاد تعداد محدودیت‌های مدل به تعداد وسایل نقلیه، افزایش تعداد وسایل نقلیه، افزایش هزینه بیشتری را نسبت به سایر

¹ ϵ -constraint

² Pareto Archived Evolution Strategy (PAES)





پارامترهای مسئله به مدل تحمیل می‌کند. زمان محاسبه مقدار تابع هدف دوم به دلیل وابستگی به تعداد مراکز توزیع، با افزایش تعداد این مراکز، افزایش می‌یابد. درصد خطای توابع هدف در تمامی مسائل ایجاد شده در ابعاد کوچک و متوسط کمتر از ۳٪ می‌باشد که کارایی الگوریتم *NSGA-II* پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۵-۱- نتایج حل عددی

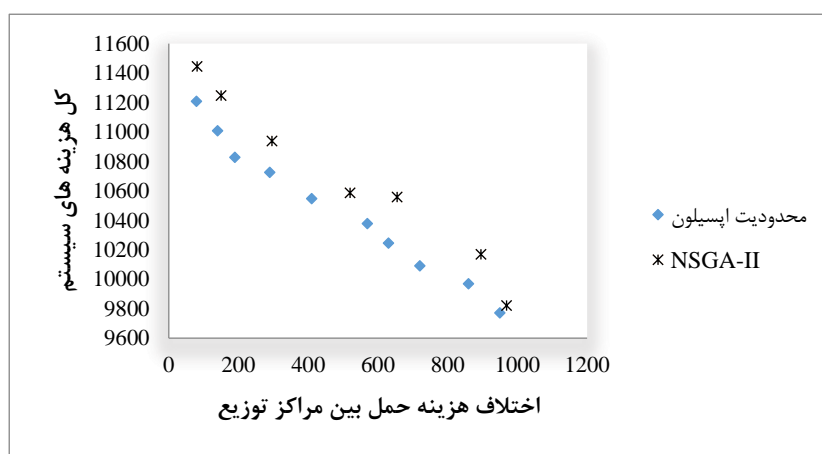
جهت مقایسه کارایی الگوریتم پیشنهادی *NSGA-II*، تمامی ۱۰ مسئله‌ای ایجاد شده در ابعاد کوچک و متوسط را توسط الگوریتم *NSGA-II* و روش محدودیت افسیلون حل کرده و نتایج حاصل از آن‌ها را توسط دو شاخص *MID* و *SM*، با یکدیگر مقایسه شده‌است. مقایسه نتایج حل عددی مطابق جدول ۴ می‌باشد. همچنین جدول ۵ نتایج عددی بررسی شاخص‌ها برای حل ابعاد بزرگ مسئله توسط الگوریتم *NSGA-II* را نشان می‌دهد.

جدول ۴- نتایج مقایسه‌ای شاخص‌های *MID* و *SM* برای حل سایز کوچک و متوسط مسائل نمونه.

Table 4- Comparative results of MID and SM indices for solving small and medium size problems.

ردیف	شماره مسئله	شاخص MID		شاخص SM	
		NSGA-II	محدودیت افسیلون	NSGA-II	محدودیت افسیلون
1	4/2/2	7.42	7.31	0.82	0.11
2	6/2/3	7.01	6.95	1.12	0.15
3	8/2/3	8.11	7.81	0.89	0.09
4	8/3/3	7.79	7.72	1.65	0.21
5	9/3/4	7.48	7.05	1.38	0.39
6	10/3/3	7.52	7.35	0.79	0.12
7	10/3/5	7.57	7.42	1.21	0.31
8	12/3/5	7.71	7.28	1.53	0.25
9	12/4/4	7.43	7.15	1.15	0.14
10	14/4/5	7.89	7.51	0.84	0.08
	میانگین	7.58	7.36	1.14	0.19

در جدول ۴ همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، شاخص *MID* برای روش محدودیت افسیلون به‌طور متوسط برابر ۷/۳۶ و برای الگوریتم *NSGA-II*، ۷/۵۸ است که این مقادیر نشان‌دهنده‌ی متوسط فاصله‌ی جواب‌های پاره‌تو از آرمان است. به عبارت دیگر جواب‌های پاره‌توی تشکیل شده توسط الگوریتم ارائه شده نسبت به روش محدودیت افسیلون به‌طور متوسط ۲/۹٪ دورتر از جواب آرمان یعنی مبدأ مختصات می‌باشد. همچنین بررسی شاخص *SM* نشان می‌دهد پراکندگی جواب‌ها برای الگوریتم *NSGA-II* برابر ۱/۱۴ و برای روش محدودیت افسیلون ۰/۱۹ می‌باشد. جهت مشاهده‌ی شماتیکی مقایسه الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش محدودیت افسیلون، در شکل ۴ نمودار جواب‌های پاره‌تو هر دو روش به صورت هم‌زمان نمایش داده شده است.



شکل ۴- مقایسه جواب‌های پاره‌تو الگوریتم *NSGA-II* و محدودیت افسیلون.

Figure 4- Pareto fronts of *NSGA-II* and ϵ -constraint.

با توجه به نتایج و مقایسه صورت گرفته در این بخش می‌توان گفت شاخص‌های مورد بررسی، کارایی الگوریتم *NSGA-II* را نشان می‌دهند. حال با اطمینان از کارایی الگوریتم در ابعاد کوچک، می‌توان جواب‌های پاره‌توی مسئله تحقیق در ابعاد بزرگ را می‌توان به دست آورد.

شاخص‌های مورد استفاده به دلیل اینکه تقریباً مستقل از تغییرات در سایز مسئله می‌باشند، می‌توانند مقایسه‌ی نسبتاً خوبی برای سائزهای مختلف مسئله باشد و ما را از حفظ کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ مسئله اطمینان دهد. به همین منظور ۱۰ مسئله در اندازه‌های بزرگ تولید و با استفاده از الگوریتم NSGA-II حل شده‌است. جواب‌های پاره‌توی حاصل با استفاده از شاخص‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج عددی برای حل ابعاد بزرگ مسئله توسط الگوریتم NSGA-II.

Table 5- Computational results for large scale problems solving by NSGAII.

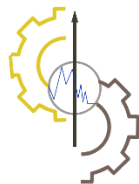
ردیف	شماره مسئله	شاخص MID	شاخص SM	زمان حل (ثانیه)
1	18/5/5	7.23	1.22	104
2	20/5/6	7.44	0.83	351
3	25/5/7	7.67	1.74	1289
4	30/6/7	7.98	0.89	1927
5	40/7/9	8.21	1.27	3745
6	50/8/10	7.24	1.94	4256
7	60/9/11	8.02	1.14	6282
8	70/10/12	7.25	0.71	8065
9	80/11/14	7.17	1.62	10721
10	100/12/15	7.95	0.75	15548
	میانگین	7.61	1.21	

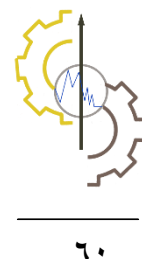
نتایج عددی فوق نشان از حفظ تقریبی کارایی الگوریتم در ابعاد بزرگ مسئله را نشان می‌دهد. در ادامه تعداد ۲۷ مسئله‌ی نمونه در ابعاد مختلف حل شده که نتایج مقایسه‌ای حاصل از آن‌ها در جدول ۶ نشان داده شده‌است. در این جدول از سه شاخص QM ، SM و MID برای مقایسه‌ی نتایج سه الگوریتم استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده مبین آن است که الگوریتم رقابت استعماری پیشنهادی، می‌تواند یک انتخاب مناسب جهت حل مسائل مکان‌یابی- مسیریابی باشد.

جدول ۶- مقایسه‌ی نتایج حل عددی بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری با استفاده از شاخص‌های QM ، SM و MID .

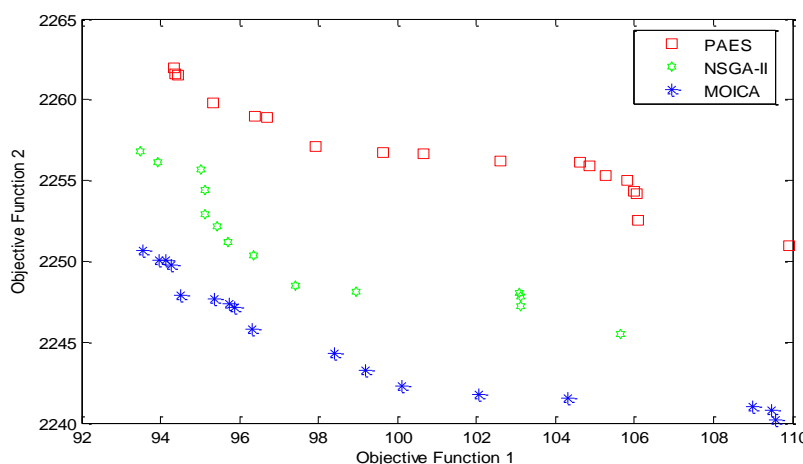
Table 6- Comparative results between metaheuristic algorithms by using QM , SM and MID indices.

Problem No.	Quality Metric (QM)			Spacing Metric (SM)			Mean Ideal Distance (MID)		
	NSGA-II	PAES	MOICA	NSGA-II	PAES	MOICA	NSGA-II	PAES	MOICA
10*3	0.235	0	0.765	0.827	0.625	0.741	0.633	0.632	0.518
10*4	0.105	0	0.895	0.661	0.495	0.778	0.704	0.597	0.582
15*3	0.250	0	0.750	0.791	0.788	0.920	0.873	0.608	0.242
15*4	0	0	1	0.693	0.785	0.868	0.712	0.872	0.348
15*5	0	0	1	0.571	1.092	0.634	0.339	0.708	0.230
20*3	0	0	1	1.184	0.999	0.881	0.776	0.694	0.523
20*4	0.235	0	0.765	0.778	1.257	0.973	0.440	0.674	0.399
20*5	0.434	0	0.565	0.560	1.036	0.874	0.518	0.845	0.538
20*6	0.347	0.217	0.434	0.733	1.031	0.924	0.575	0.751	0.621
25*3	0.100	0	0.900	1.207	1.120	1.361	0.601	0.437	0.247
25*4	0.272	0	0.727	1.001	0.878	1.287	0.663	0.762	0.718
25*5	0.292	0	0.708	0.977	1.360	1.220	0.536	0.577	0.511
25*6	0.190	0	0.809	0.940	0.977	1.481	0.482	0.576	0.287
30*3	0.167	0.083	0.750	0.651	1.084	1.116	0.697	0.731	0.632
30*4	0.059	0.294	0.647	1.059	1.322	0.810	0.762	0.547	0.485
30*5	0	0	1	0.942	0.965	0.978	0.781	0.846	0.500
30*6	0	0	1	0.670	0.916	0.980	0.297	0.481	0.379
30*7	0.118	0	0.882	0.986	1.478	1.041	0.479	0.646	0.276
30*8	0	0	1	0.586	0.911	0.642	0.579	0.860	0.554
40*3	0.071	0	0.928	1.302	1.417	1.390	0.707	0.776	0.430
40*4	0.363	0.272	0.364	1.019	1.167	1.267	0.609	0.750	0.452
40*5	0.357	0	0.642	1.628	1.295	1.649	0.554	0.813	0.377
40*6	0.318	0.182	0.500	1.059	1.272	1.321	0.664	0.677	0.408
40*7	0.370	0	0.630	0.984	1.374	1.372	0.731	0.765	0.563
40*8	0.041	0	0.958	1.037	1.296	0.935	0.430	0.767	0.322
40*9	0.240	0	0.760	1.267	1.049	1.410	0.506	0.601	0.431
40*10	0.111	0.111	0.778	0.979	1.422	0.928	0.692	0.823	0.360





در شکل ۵ به صورت شماتیکی نقاط پاره‌تو مربوط به هر سه الگوریتم را به صورت هم‌زمان، نشان داده شده است که از روی آن می‌توان برتری الگوریتم *MOICA* را نسبت به دو الگوریتم *NSGA-II* و *PAES* مشاهده کرد.



شکل ۵- جواب‌های پارتو مربوط به هر الگوریتم در سایز ۳۰ با تعداد مرکز توزیع ۶.

Figure 5- Pareto fronts obtained by three algorithms for a problem of 6*30 size.

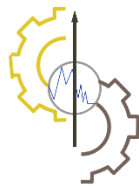
۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

حمل و نقل در سیستم‌های اقتصادی اعم از خدماتی، تولیدی و توزیع از جایگاه ویژه و پراهمیتی برخوردار می‌باشد و بخش عمده‌ای از تولید ناخالص ملی کشورها را به خود اختصاص می‌دهد. بهبود در سیستم‌های حمل و نقل به معنای بهبود در مسیرهای طی شده و حذف پیمودن مسافت‌های غیرضروری و بهینه‌سازی مسیرهای طی شده در هر سیستم می‌باشد. به طور متوسط حدود ۲۰٪ قیمت تمام شده یک محصول صرف هزینه‌های توزیع آن می‌شود. مسئله مسیریابی وسایل نقلیه یکی از مفاهیم کاربردی در حوزه حمل و نقل است که هدف آن طراحی مجموعه‌ای بهینه‌ای از مسیرها برای سرویس‌دهی به مشتریان است. این مسئله در حالت عادی شامل یک انبار، ناوگانی از وسایل نقلیه که در انبار استقرار یافته‌اند و مجموعه‌ای از مشتریان می‌باشد که می‌بایست سرویس‌دهی شوند. هدف مسئله مسیریابی وسایل نقلیه در ساده‌ترین و معمول‌ترین حالت حداقل‌سازی هزینه‌های کلی طی مسیر بر اساس حداکثر زمان کاری و حداکثر محدودیت ظرفیت وسایل نقلیه می‌باشد.

در این تحقیق به ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه برای حل مسئله مکان‌یابی - مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود پرداخته شد. مدل ریاضی ارائه شده به طور هم‌زمان درصدد حداقل کردن هزینه‌ها و کمینه کردن عدم توازن میزان مسافت طی شده توسط وسایل حمل و نقل می‌باشد. برای حل مدل ریاضی، نمونه مسائل گوناگونی در ابعاد مختلف ارائه و از الگوریتم‌های *PAES* و *NSGA-II* و *MOICA* برای حل آن استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم *MOICA* پیشنهادی، نسبت به الگوریتم‌های *NSGA-II* و *PAES* توانسته است مرز پارتو کامل‌تری را ارائه کند و جواب‌های با کیفیت بالاتری از نظر هر دو هدف ایجاد کند. به منظور توسعه این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که عدم قطعیت در پارامترهای مختلف مدل مورد بررسی قرار گرفته و اهدافی نظیر کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و افزایش مسئولیت اجتماعی به مدل ریاضی اضافه شود. این تحقیق را می‌توان از جهات مختلفی توسعه داد:

۱. به‌کارگیری برخی از مفروضات مانند وجود ناوگان حمل غیر همگن، لحاظ کردن مسیرهای یک‌طرفه، در نظر گرفتن طرح و عامل ترافیک در مسیرها، در نظر گرفتن سهمیه‌ی مصرف سوخت، لحاظ کردن سطح مهارت و دستمزدهای وابسته برای رانندگان و احتمال رخداد تصادف برای هر راننده می‌تواند مسئله‌ی مورد تحقیق را به مسائل دنیای واقعی نزدیک‌تر کند.
۲. لحاظ نمودن مدل‌های عدم قطعیت مانند پارامترهای فازی یا احتمالی و ارائه روش‌های ابتکاری برای حل آن مسائل پیشنهاد می‌گردد.
۳. لحاظ کردن اهدافی چون بالانس تعداد مشتریان جهت خدمت‌دهی توسط مراکز توزیع، بالانس زمان کارکرد وسایل نقلیه مختلف و یا مراکز توزیع، حداکثر برآورد سازی تقاضای مشتریان توصیه می‌شود.

- Adeleke, O. O., Idoko, S., Kolo, S. S., Anwar, A. R., Sijuwola, O. O., & Akinola, O. (2019). Web-based advanced traveller information system for minna metropolis, Nigeria. *Arid Zone journal of engineering, technology and environment*, 15(4), 1026-1037.
- Bányai, T., Tamás, P., Illés, B., Stankevičiūtė, Ž., & Bányai, Á. (2019). Optimization of municipal waste collection routing: Impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. *International journal of environmental research and public health*, 16(4), 634. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040634>
- Basso, R., Kulcsár, B., & Sanchez-Díaz, I. (2021). Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction. *Transportation research part B: methodological*, 145, 24-55.
- Christofides, N., & Eilon, S. (1969). An algorithm for the vehicle-dispatching problem. *Journal of the operational research society*, 20(3), 309-318.
- Cuthbertson, R. W. (1998). The Logic of logistics: theory, algorithms and applications for logistics management. *Journal of the operational research society*, 49(9), 1016-1017. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600034>
- Ji, Y., Du, J., Han, X., Wu, X., Huang, R., Wang, S., & Liu, Z. (2020). A mixed integer robust programming model for two-echelon inventory routing problem of perishable products. *Physica a: statistical mechanics and its applications*, 548, 124481. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124481>
- Li, P., Lan, H., & Saldanha-Da-Gama, F. (2019). A bi-objective capacitated location-routing problem for multiple perishable commodities. *IEEE access*, 7, 136729-136742.
- Min, H., Jayaraman, V., & Srivastava, R. (1998). Combined location-routing problems: a synthesis and future research directions. *European journal of operational research*, 108(1), 1-15.
- Rafie-Majd, Z., Pasandideh, S. H. R., & Naderi, B. (2018). Modelling and solving the integrated inventory-location-routing problem in a multi-period and multi-perishable product supply chain with uncertainty: Lagrangian relaxation algorithm. *Computers & chemical engineering*, 109, 9-22.
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European journal of operational research*, 39(2), 150-156.
- Shahabi-Shahmiri, R., Asian, S., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mousavi, S. M., & Rajabzadeh, M. (2021). A routing and scheduling problem for cross-docking networks with perishable products, heterogeneous vehicles and split delivery. *Computers & industrial engineering*, 157, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107299>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Rabbani, M., Saremi, A., & Safaei, N. (2005). Solving the backhaul vehicle routing problem by genetic algorithms. *35th international conference on computers and industrial engineering* (pp. 1905-1910). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey. https://www.researchgate.net/profile/Reza-Tavakkoli-Moghaddam/publication/255636808_SOLVING_THE_BACKHAUL_VEHICLE_ROUTING_PROBLEM_BY_GENETIC_ALGORITHMS/links/54a53b9f0cf267bdb90817fc/SOLVING-THE-BACKHAUL-VEHICLE-ROUTING-PROBLEM-BY-GENETIC-ALGORITHMS.pdf
- Tsang, Y. P., Wu, C. H., Lam, H. Y., Choy, K. L., & Ho, G. T. (2021). Integrating internet of things and multi-temperature delivery planning for perishable food E-commerce logistics: a model and application. *International journal of production research*, 59(5), 1534-1556.
- Wang, Y., Yuan, Y., Guan, X., Xu, M., Wang, L., Wang, H., & Liu, Y. (2020). Collaborative two-echelon multicenter vehicle routing optimization based on state-space-time network representation. *Journal of cleaner production*, 258, 120590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120590>
- Webb, M. H. J. (1968). Cost functions in the location of depots for multiple-delivery journeys. *Journal of the operational research society*, 19(3), 311-320.
- Zhao, Z., Li, X., & Zhou, X. (2020). Optimization of transportation routing problem for fresh food in time-varying road network: Considering both food safety reliability and temperature control. *PloS one*, 15(7), e0235950.



¹ Particle Swarm Optimization (PSO)

² Invasive Weed Optimization (IWO)